



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

LÁVKA PRO PĚŠÍ PŘES LAGUNU

PEDESTRIAN BRIDGE ACROSS THE LAGOON

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kristína Klinková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADIM NEČAS, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav betonových a zděných konstrukcí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Kristína Klinková
Název	Lávka pro pěší přes lagunu
Vedoucí práce	Ing. Radim Nečas, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Podklady:

Situace, příčný a podélný řez, geotechnické poměry.

Základní normy:

ČSN 73 6201 Projektování mostních objektů.

ČSN 73 6214 Navrhování betonových mostních konstrukcí.

ČSN EN 1990 včetně změny A1: Zásady navrhování konstrukcí.

ČSN EN 1991-2: Zatížení mostů dopravou.

ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.

ČSN EN 1992-2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady.

Literatura doporučená vedoucím diplomové práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Pro zadaný problém navrhnete dvě až tři varianty řešení a zhodnotíte je.

Ve výběru varianty se zaměřte na konstrukci podporovanou obloukem.

Podrobný návrh nosné konstrukce vybrané varianty mostu proveďte podle mezních stavů včetně zohlednění vlivu výstavby mostu na jeho návrh.

Ostatní úpravy provádějte podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Požadované výstupy:

Textová část (obsahuje průvodní zprávu a ostatní náležitosti podle níže uvedených směrnic)

Přílohy textové části:

P1. Použité podklady a varianty řešení

P2. Výkresy (přehledné, podrobné a detaily v rozsahu určeném vedoucím diplomové práce)

P3. Stavební postup a vizualizace

P4. Statický výpočet (v rozsahu určeném vedoucím diplomové práce)

Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy VŠKP (1x).

Popisný soubor závěrečné práce (1x).

Diplomová práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě podle směrnic a 1x na CD.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Radim Nečas, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Cílem diplomové práce je návrh lávky pro pěší přes lagunu. Byly vypracovány tři varianty přemostění. Pro posouzení byla vybrána varianta konstrukce tvořené ocelovými oblouky a betonovým předpjatým pásem. Jedna kapitola práce je věnována ideálnímu tvaru oblouku pro různé typy zatížení. Výpočet účinků zatížení je provedený v programu Ansys 17.0. Jsou zohledněny stadia výstavby. Posouzený je mezní stav únosnosti a použitelnosti. Je provedena modální analýza, analýza odezvy na harmonické buzení a stabilitní výpočet. Pro posouzení betonových průřezů byl použit program MS Excel. Ocelové průřezy byly posouzeny v programu Ansys 17.0. Návrh a posouzení bylo provedeno dle evropských norem.

Klíčová slova

lávka pro pěší, předpjatý pás, oblouková konstrukce, stadia výstavby, mezní stav únosnosti, mezní stav použitelnosti, ideální tvar oblouku, ztráta stability, modální analýza, harmonická odezva, Rayleighovo tlumení, dynamické modely zatížení

Abstract

The aim of this thesis is the design and analysis of pedestrian bridge across the lagoon. Three variants were designed. The variant of structure, which combines stress ribbon with steel arches, was chosen for analysis. There is a chapter in this thesis which deals with an ideal shape of arches for different types of loads. The calculation of load effects was made in software Ansys 17.0, considering construction stages. Ultimate limit state and state limit state are evaluated. For evaluation of concrete cross sections was used MS Excel. Steel cross sections were evaluated in software Ansys 17.0. Dynamic behaviour of construction was assessed. The mode shapes and natural frequencies were calculated. The harmonic excitation response was studied. The loss of stability was checked. The design and assessment are according to the european standards.

Keywords

pedestrian bridge, stress ribbon, arch, construction stages, ultimate limit state, ultimate serviceability state, ideal shape of arch, loss of stability, modal analysis, harmonic response, Rayleigh damping, dynamic load models

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Kristína Klinková *Lávka pro pěší přes lagunu*. Brno, 2017. 43 s., 375 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. Radim Nečas, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2018

.....
podpis autora
Bc. Kristína Klinková

Podakovanie

Predovšetkým by som chcela poďakovať Ing. Radimovi Nečasovi, Ph.D., za podnetný prístup ku konzultáciám, čas, ktorý mi venoval a trpezlivosť s mojimi otázkami.

Ďalej by som chcela poďakovať Ing. Josefovi Martináskovi, Ph.D. za konzultácie a hlavne ochotu pomôcť.

Obsah

1 Úvod	10
2 Varianty riešenia	10
2.1 Variant 1	10
2.2 Variant 2	11
2.3 Variant 3	12
2.4 Porovnanie variant	13
3 Ideálny tvar oblúku	14
3.1 Úvod	14
3.1.1 Lanová rovnica - vzťahy	14
3.2 Overenie	15
3.3 Spôsoby zaťaženia	16
3.3.1 Spojité rovnomerné zaťaženie na priemet	16
3.3.2 Trojuholníkové zaťaženie	16
3.3.3 Spojité zaťaženie na časti oblúku	17
3.3.4 Pravá reťazovka	17
3.4 Vyhodnotenie	18
3.4.1 Prosté podoprenie,oblúk s malou smelosťou	18
3.4.2 Votknutie,oblúk s malou smelosťou	19
3.4.3 Prosté podoprenie,oblúk s veľkou smelosťou	19
3.4.4 Prosté podoprenie,oblúk s malou smelosťou, roztlačený vo vrchole	19
3.5 Záver	20
3.6 Obrázková príloha–výsledky, vybrané prípady	21
3.6.1 Oblúk s malou smelosťou, klbové uloženie, trojuholníkové zaťaženie	21
3.6.2 Oblúk s malou smelosťou, votknutý, pravá reťazovka	21
3.6.3 Oblúk s veľkou smelosťou, klbové uloženie, spojité zaťaženie na časti oblúku	22
3.6.4 Oblúk s malou smelosťou, roztlačený vo vrchole, spojité rovnomerné zaťaženie	22
4 Geometria	23
4.1 Statická schéma lávky	23
4.1.1 Geometria mostovky	23
4.1.2 Geometria oblúku	24
4.2 Výsledná geometria	26
4.2.1 Popis	26
4.2.2 Nájdené geometria	27
4.2.3 Vzájomná poloha mostovky a oblúkov	29
5 Fázy výstavby	30
6 Posúdenie konštrukcie	31
6.1 Montážny stav	31
6.2 Východzí stav	31
6.3 Medzný stav použiteľnosti	31
6.3.1 Mostovka	31
6.3.2 Obmedzenie priehybu	32

6.4	Medzný stav únosnosti	32
6.4.1	Mostovka	33
6.4.2	Oceľové prvky – spôsob posúdenia	33
6.4.3	Oceľový oblúk – imperfekcie	34
7	Dynamika	36
7.1	Modálna analýza	36
7.2	Odozva na harmonické zaťaženie	36
7.2.1	DLM1	36
7.2.2	DLM3	37
8	Stabilita	39
8.1	Stabilita vo zvislom smere	39
8.2	Stabilita vo vodorovnom smere	39
9	Záver	40
	Zoznam použitej literatúry	41
	Zoznam príloh	42
	Zoznam obrázkov	43

1 Úvod

Cieľom tejto diplomovej práce je návrh a posúdenie lávky pre peších cez lagúnu. Variantne boli navrhnuté tri rôzne konštrukcie premošťujúce lagúnu. Po ich vzájomnom porovnaní bol pre ďalšiu analýzu vybraný variant konštrukcie pozostávajúcej z dvoch oceľových oblúkov a betónového predpätého pásu.

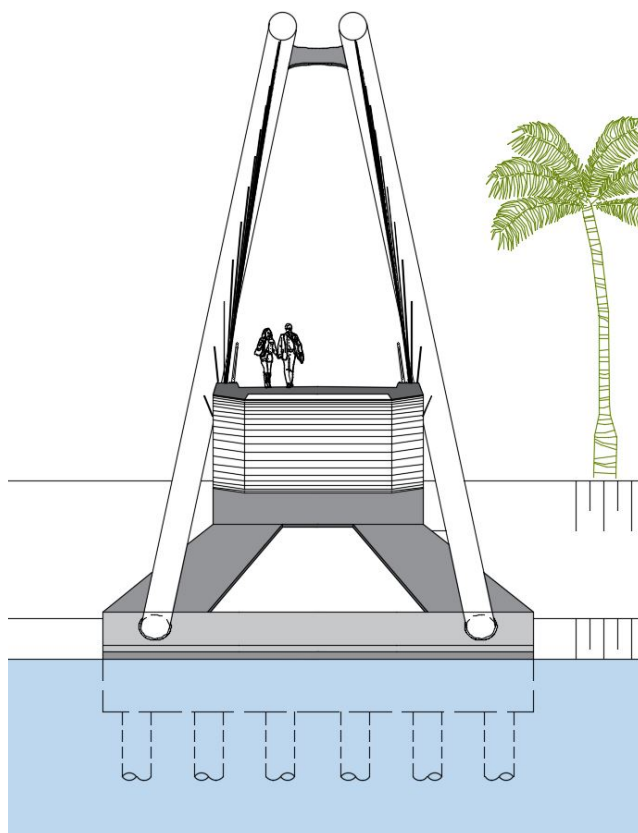
Pri návrhu je venovaná pozornosť nájdeniu východzej geometrie konštrukcie. V statickom výpočte sú posúdené montážne stavy lávky, medzný stav použiteľnosti a medzný stav únosnosti podľa platných európskych noriem. Predmetom výpočtu je aj dynamická odozva lávky na harmonické budenie.

2 Varianty riešenia

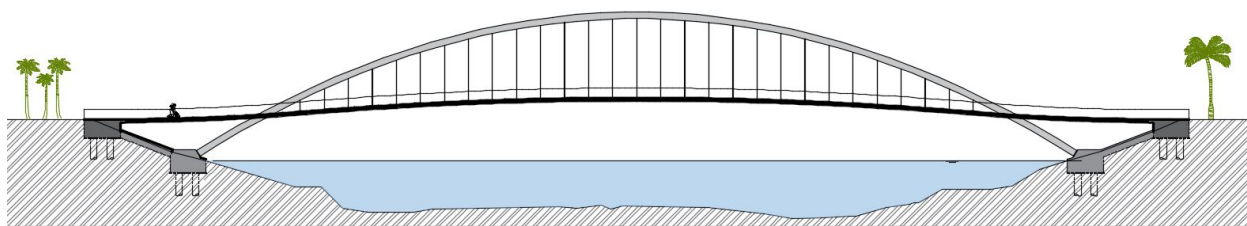
Lávka má premošťovať lagúnu v mieste, kde jej šírka dosahuje pri bežnej hladine 110 m. Priemerná hĺbka lagúny je 6 m. Nasledujúce tri varianty riešenia boli vypracované zohľadňujúc značnú dĺžku premostenia a požiadavku eliminácie styku častí lávky s vodou.

2.1 Variant 1

Prvým variantom je oblúková konštrukcia s medziľahlou mostovkou. Oblúky sú dva, priečne sklonené smerom k ose lávky. Stredná časť mostovky je zavesená pomocou zvislých oceľových závesov na oblúky. Krajné časti mostovky, nezavesené na oblúk, fungujú ako predpätý pás. Konštrukcia je uvažovaná ako samokotvený systém – základy sú namáhané iba zvislou silou.



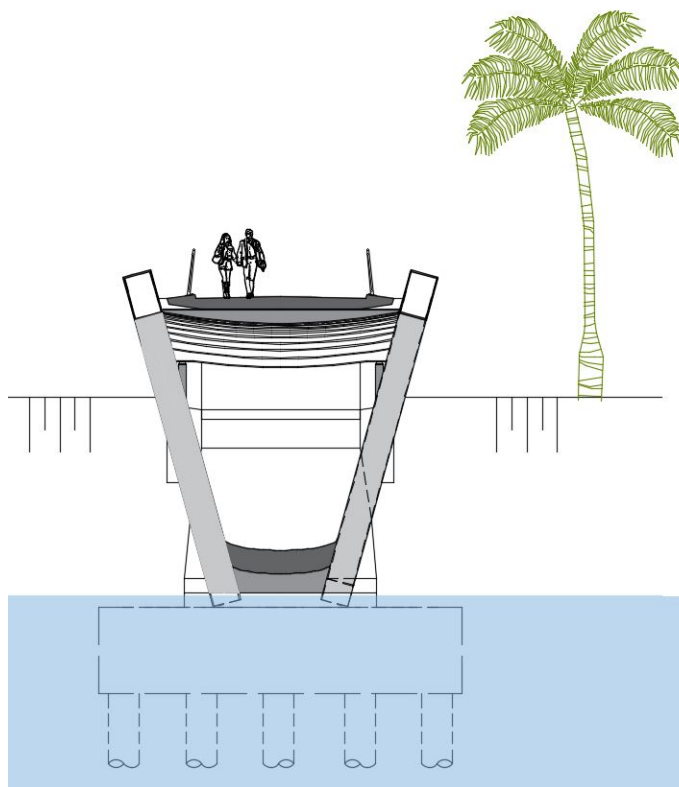
Obr. 1: Variant 1 – priečný rez



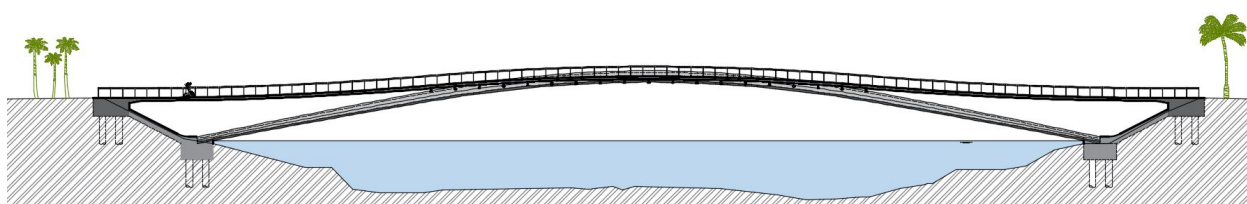
Obr. 2: Variant 1 – pohľad

2.2 Variant 2

Druhým variantom je konštrukcia tvorená predpätým pásom, v strednej časti uloženým pomocou priečnikov na oceľové oblúky. Oblúky sú dva, vyklonené smerom von od osi lávky. Konštrukcia je uvažovaná ako samokotvený systém – základy sú namáhané iba zvislou silou. Prenos vodorovnej oblúkovej sily a vodorovnej predpínacej sily zabezpečuje vzpera spájajúca päty oblúkov a kotevný blok predpätého pásu.



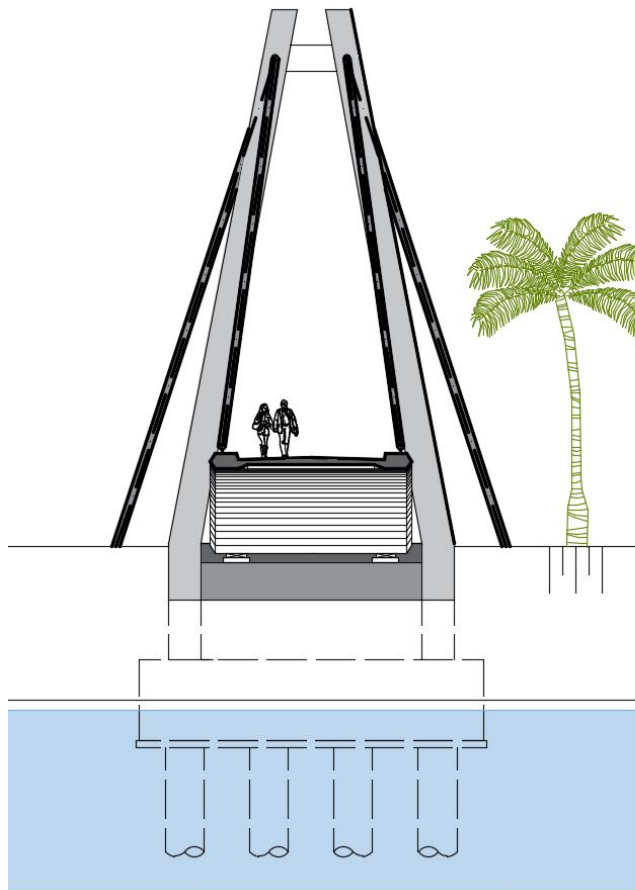
Obr. 3: Variant 2 – priečny rez



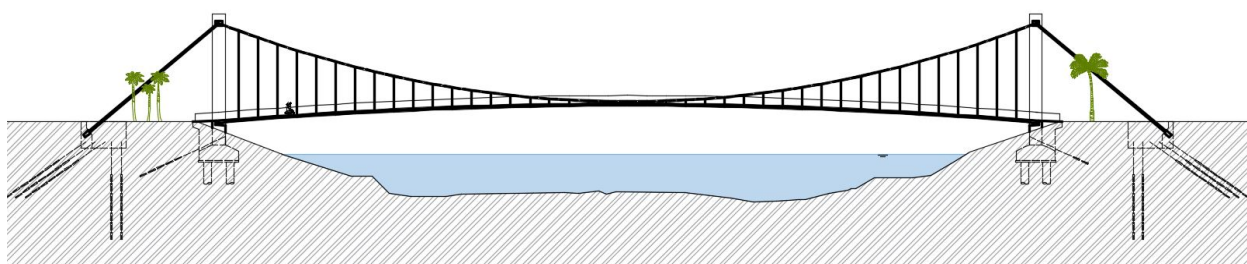
Obr. 4: Variant 2 – pohľad

2.3 Variant 3

Vzhľadom k značnému rozpätiu lávky je ako tretí variant navrhnutá visutá konštrukcia. Navrhnuté sú dva zvislé piliere tvaru A. Priečnik piliera plní zároveň funkciu krajnej mostnej podpory – slúži na uloženie mostovky a uzavrenie zemného telesa. Aby bol eliminovaný účinok zemného tlaku na pylón, je priečnik zakotvený do zeminu pomocou zemných kotiev.



Obr. 5: Variant 3 – priečny rez

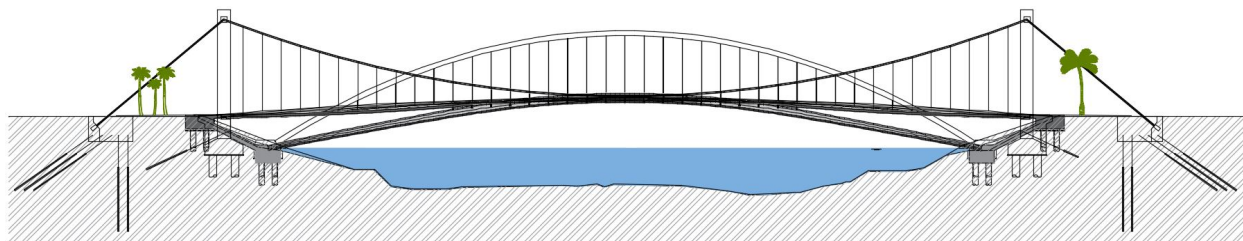


Obr. 6: Variant 3 – pohľad

2.4 Porovnanie variant

Zo statického hľadiska majú varianty 1 a 2 podobný statický systém – jedná sa o samokotvený systém tvorený oceľovým oblúkom a predpätým pásom. Výhodou oproti variantu 3 je eliminácia vodorovných účinkov na podložie. Variant 3 je naopak náročný na založenie. Jednak je nutné kotviť visuté lano do podložia a taktiež je eliminované namáhanie pylónu od zemného tlaku pomocou zemných kotiev. Z tohoto hľadiska sa tento variant nejaví ako vhodný.

Medzi variantom 1 a 2 je teda hlavne estetický rozdiel. Variant 2 využíva smelý oblúk, ktorý sa začleňuje do krajiny a lávka tak plynulo naväzuje na okolitý terén. Vzhľadom na rozpätie oblúku, je vzopätie oblúku vo variante 1 pomerne veľké. Vzopätie oblúku tak pôsobí mierne rušivým dojmom.



Obr. 7: Porovnanie variant

Z navrhnutých variant bol preto k ďalšej analýze zvolený variant 2 (predpätý pás podoprený oblúkom).

3 Ideálny tvar oblúku

Pretože hlavným nosným prvkom vybraného variantu sú oblúky, pre lepšie porozumenie ich správania bola vypracovaná nasledujúca štúdia pojednávajúca o ideálnom tvare oblúkovej konštrukcie.

3.1 Úvod

Oblúkové konštrukcie sú vo všeobecnosti namáhané normálovou silou a ohybovým momentom. Pretože ohybové namáhanie je značne neefektívne, je snaha toto namáhanie eliminovať.

Teoreticky existuje tvar oblúku, v ktorom je oblúk namáhaný iba osovo. Jedná sa o tzv. tlakovú čiaru. Pretože v každom bode tlakovej čiary je nulový ohybový moment, v každom bode je splnená momentová podmienka rovnováhy.

Podobnú vlastnosť majú lanové konštrukcie. Lano je konštrukcia s teoreticky nulovou ohybovou tuhosťou, nie je schopné preniesť ohybové zaťaženie. Preto v každom jeho bode je nulový ohybový moment.

Využitím tejto podobnosti je možné riešiť tvar tlakovej čiary – obráteným riešením lanovej rovnice.

Cieľom nasledujúcej kapitoly je overenie vhodnosti použitia lanovej rovnice za účelom riešenia ideálneho tvaru oblúku.

3.1.1 Lanová rovnica - vzťahy

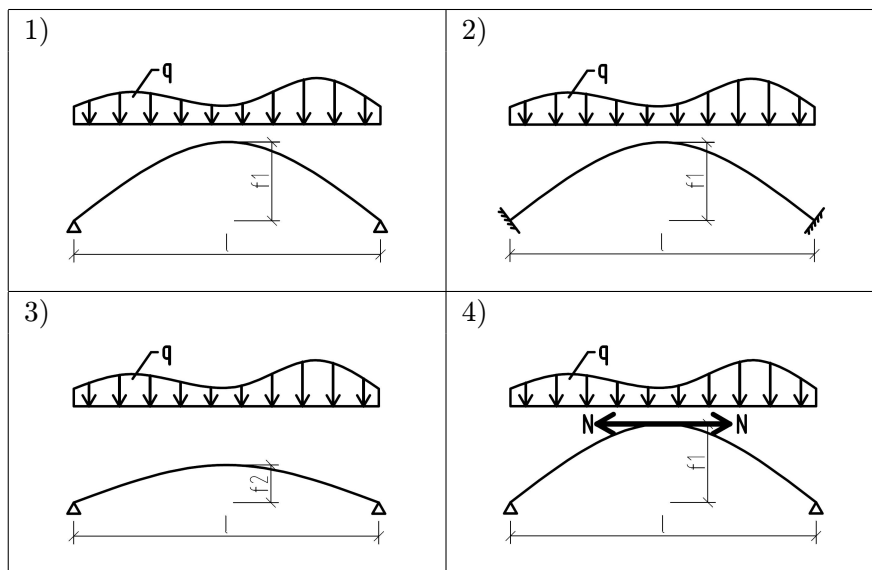
Lanová rovnica	$z''(x) = \frac{-q(x)}{H}$
Rovnica dotýčnice	$z'(x) = \int z''(x)dx = \frac{V_0(x)}{H} + \frac{h}{l}$
Rovnica priavesovej krivky	$z(x) = \int z'(x)dx = \frac{M_0(x)}{H} + \frac{h}{l} \cdot x$
Normálová sila	$N(x) = \sqrt{H^2 + N_z^2} = H \cdot \sqrt{1 + (z'(x))^2} = H \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{V_0(x)}{H} + \frac{h}{l}\right)^2}$

$z(x)$	z-ová súradnica v bode x
H	Horizontálna zložka reakcie
$M_0(x)$	Moment od zaťaženia na náhradnom prostom nosníku
$V_0(x)$	Posúvajúca sila od zaťaženia na náhradnom prostom nosníku
h	rozdiel výšky koncových bodov
l	rozpätie

Z rovnice pre $z(x)$ vyplýva, že tvar krivky je priamo úmerný momentu na prostom nosníku. V dôsledku rôznej výšky podpor môže dôjsť k nanajvýš lineárnemu posunu krivky ohybového momentu.

3.2 Overenie

Overenie je prevedené pre rôzne spôsoby zaťaženia, podoprenia a vzopätia oblúku, pri zachovaní konštantných prierezových charakteristík.



Obr. 8: Tlaková čiara, overenie – spôsoby zaťaženia

Pre spôsoby zaťaženia 1,2,3 sú uvažované dva stavy.

Prvý stav zohľadňuje skutočnú normálovú tuhosť oblúku. Vplyvom normálových síl dochádza k stlačeniu strednice oblúku a následnej zmene geometrie oblúku.

V druhom stave je oblúk považovaný za nekonečne tuhý. Aby mohli byť použité rovnaké prierezové charakteristiky, vplyv nestlačiteľnosti strednice je simulovaný pomerným pretvorením. Pretože je hodnota normálovej sily známa pre ľubovoľný bod oblúku, je známe aj pomerné pretvorenie v ľubovoľnom bode. Pretvorenie je úmerné normálovej sile a má hodnotu $\epsilon(x) = \frac{N(x)}{E \cdot A}$. Oblúk je výsledne zaťažený vonkajším zaťažením a deformačným zaťažením, ktoré vyrovná stlačenie strednice. Vďaka tomu oblúk zostáva aj po vnesení vonkajšieho zaťaženia v pôvodnej geometrii.

Štvrtý spôsob zaťaženia vystihuje rozoprenie oblúku vo vrchole. Oblúk je vo vrchole rozdelený na dve symetrické polovice, ktoré sú od seba odtlačované horizontálnou silou. Týmto spôsobom je do oblúku vnesená normálová sila a teda normálové pretvorenie ϵ , vďaka ktorému sa oblúk po vnesení vonkajšieho zaťaženia vracia do požadovanej geometrie.

Vonkajšie zaťaženie je do modelu vnášané v uzloch. Spojité zaťaženie je prepočítané na odpovedajúce uzlové zaťaženie.

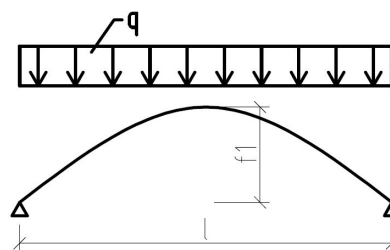
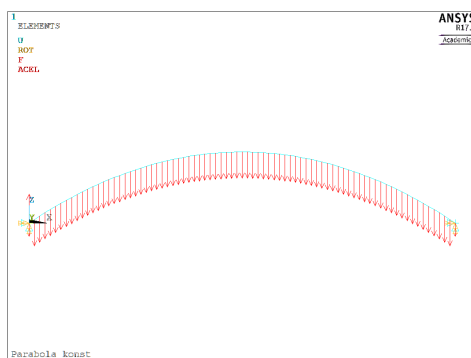
Parametre oblúku:

Oblúk	Rozpätie	$l = 60 \text{ m}$
	Vzopätie oblúk s malou smelosťou	$f_1 = 10 \text{ m}$
	Vzopätie oblúk s veľkou smelosťou	$f_2 = 2 \text{ m}$
Prierez	Výška	$h = 0,5 \text{ m}$
	Šírka	$b = 0,5 \text{ m}$
Materiál	Modul pružnosti	$E = 34 \text{ GPa}$
Zaťaženie		$q = 10 \text{ kN/m}$

3.3 Spôsoby zaťaženia

3.3.1 Spojité rovnomerné zaťaženie na priemet

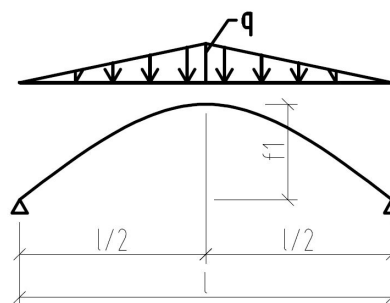
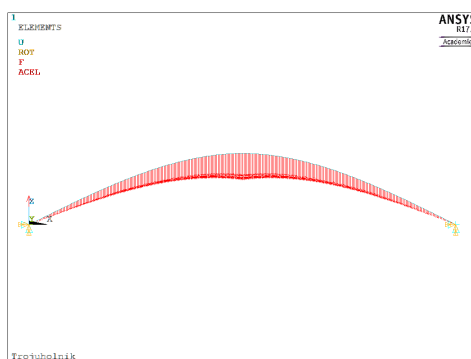
Zvislá reakcia	$R = \frac{q \cdot l}{2}$
Moment na prostom nosníku	$M_0(x) = R \cdot x - q \cdot x \cdot \frac{x}{2} = \frac{q \cdot l \cdot x}{2} - \frac{q \cdot x^2}{2}$
Posúvajúca sila na prostom nosníku	$V_0(x) = R - q \cdot x = \frac{q \cdot l}{2} - q \cdot x$
Horizontálna zložka reakcie	$H = \frac{M_0(l/2)}{f}$
Tvar tlakovej čiary	Parabola



Obr. 9: Spojité rovnomerné zaťaženie na priemet

3.3.2 Trojuholníkové zaťaženie

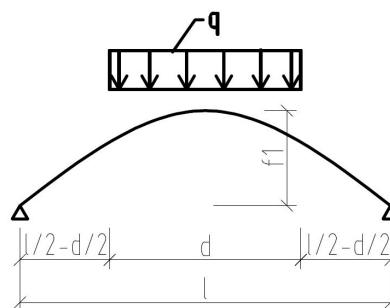
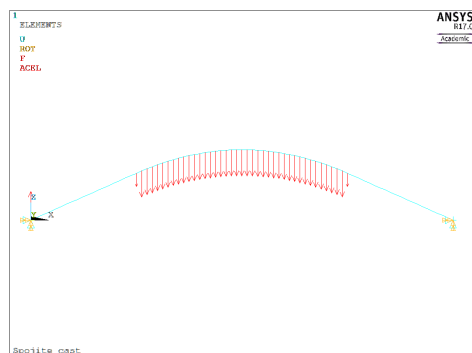
Zvislá reakcia	$R = \frac{q \cdot l}{2} \cdot \frac{l}{2} = \frac{q \cdot l}{4}$
Moment na prostom nosníku	$M_0(x) = R \cdot x - q \cdot \frac{x}{l} \cdot \frac{x}{2} \cdot \frac{x}{3} = \frac{q \cdot l \cdot x}{4} - \frac{q \cdot x^3}{3 \cdot l}$
Posúvajúca sila na prostom nosníku	$V_0(x) = R - q \cdot \frac{x}{l} \cdot \frac{x}{2} = \frac{q \cdot l}{4} - \frac{q \cdot x^2}{l}$
Horizontálna zložka reakcie	$H = \frac{M_0(l/2)}{f}$
Tvar tlakovej čiary	Kubická parabola



Obr. 10: Trojuholníkové zaťaženie

3.3.3 Spojité zatažení na části obluku

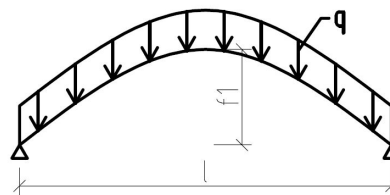
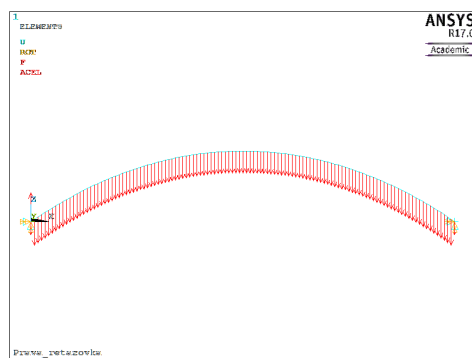
Zvislá reakcia	$R = \frac{q \cdot d}{2}$
Moment na prostom nosníku	$M_0(x) = R \cdot x, \quad x \in (0; \frac{l-d}{2})(\frac{l}{2} + \frac{l-d}{2}, l)$ $M_0(x) = R \cdot x - \frac{1}{2} \cdot q \cdot (x - \frac{l-d}{2})^2, \quad x \in (\frac{l-d}{2}, \frac{l}{2} + \frac{l-d}{2})$
Posuvající síla na prostom nosníku	$V_0(x) = R, \quad x \in (0; \frac{l-d}{2})(\frac{l}{2} + \frac{l-d}{2}, l)$
Posuvající síla na prostom nosníku	$V_0(x) = R - q \cdot (x - \frac{l-d}{2}), \quad x \in (\frac{l-d}{2}, \frac{l}{2} + \frac{l-d}{2})$
Horizontální složka reakcie	$H = \frac{M_0(l/2)}{f}$
Tvar tlakovej čiar	Priamka pre $x \in (0; \frac{l-d}{2})(\frac{l}{2} + \frac{l-d}{2}, l)$ Parabola pre $x \in (\frac{l-d}{2}, \frac{l}{2} + \frac{l-d}{2})$



Obr. 11: Spojité zatažení na části obluku

3.3.4 Pravá reťazovka

Pre spojité zataženie, ktoré nepôsobí na priemet, ale na skutočnú dĺžku konštrukcie je riešením lanovej rovnice tzv. pravá reťazovka.

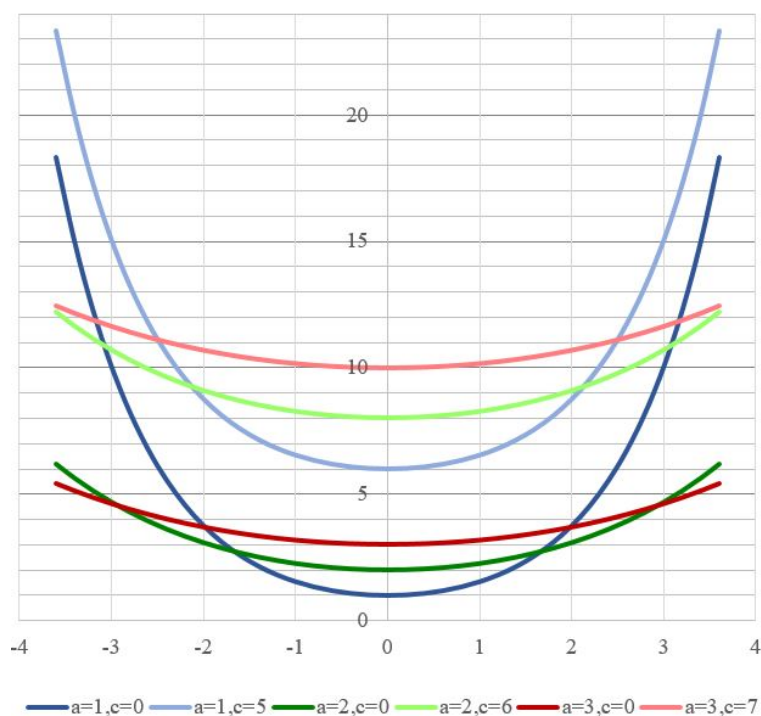


Obr. 12: Spojité zatažení na dĺžku obluku

Tvar tlakovej čiar je popísaný funkciou hyperbolický kosínus. Rovnica pravej reťazovky je v tvare $z(x) = a \cdot \cosh(\frac{x}{a}) + c$, kde a je parameter reťazovky určujúci jej krivosť vo vrchole. Parameter c určuje polohu na zvislej osi. Parametre a a c boli hľadané tak, aby bola reťazovka v požadovanej geometrii - so vzopätím f a rozpätím l .

Hľadané parametre boli získané numerickým riešením rovnice.

Normálová síla a uzlové zataženie na oblúku boli určené zo známych vzťahov.

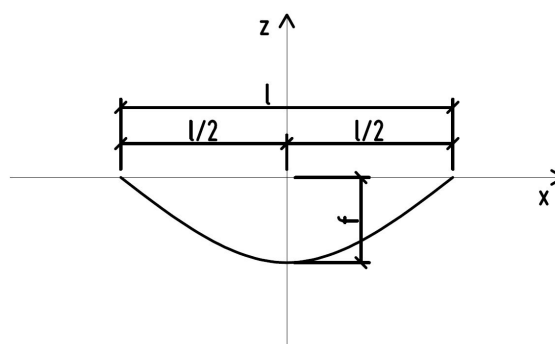


Obr. 13: Reflektory pro různé parametry a, c

$$z\left(\frac{-l}{2}\right) = a \cdot \cosh\left(\frac{-l}{2a}\right) + c = 0$$

$$z(0) = a \cdot \cosh\left(\frac{0}{a}\right) + c = a + c = -f$$

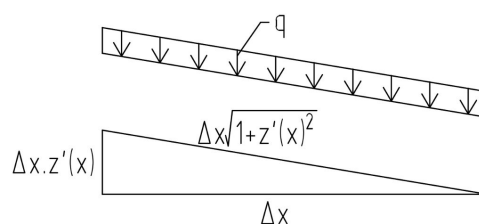
$$a \cdot \cosh\left(\frac{l}{2a}\right) - f - a = 0$$



Normálová síla: $N(x) = H \cdot \sqrt{1 + (z'(x))^2}$

Bodové zatížení: $Q = q \cdot \Delta x \cdot \sqrt{1 + (z'(x))^2}$

Rovnice dotyčnice: $z'(x) = \sinh\left(\frac{x}{a}\right)$



3.4 Vyhodnotenie

3.4.1 Prosté podoprenie, oblúk s malou smelosťou

Spôsob zaťaženia	$M_0(l/2)$ [kNm]	H_0 [kN]	$u_z(l/2)$ [m]	$\Delta M(l/2)$ [kNm]	$H \cdot u_z(l/2)$ [kNm]	$\frac{\Delta M(l/2)}{M_0(l/2)}$ [%]
Spojité rovnomerné	4500	450.0	0.004548	1.821	2.047	0.040
Trojuholníkové	3000	300.0	0.003148	1.281	0.944	0.043
Spojité na časti	3375	337.5	0.003583	1.466	1.209	0.043
Spojité na dĺžku	4505	450.5	0.004691	1.876	2.113	0.042

3.4.2 Votknutie,oblúk s malou smelosťou

Spôsob zaťaženia	$M_0(l/2)$ [kNm]	H_0 [kN]	$u_z(l/2)$ [m]	$\Delta M(0)$ [kNm]	$\Delta M(l/2)$ [kNm]	$H \cdot u_z(l/2)$ [kNm]	$\frac{\Delta M(l/2)}{M_0(l/2)}$ [%]
Spojité rovnomerné	4500	450.0	0.005357	6.130	3.747	2.411	0.083
Trojuholníkové	3000	300.0	0.003470	3.827	2.557	1.041	0.085
Spojité na časti	3375	337.5	0.003828	4.023	2.041	1.292	0.060
Spojité na dĺžku	4505	450.5	0.005566	6.394	3.873	2.508	0.086

3.4.3 Prosté podoprenie,oblúk s veľkou smelosťou

Spôsob zaťaženia	$M_0(l/2)$ [kNm]	H_0 [kN]	$u_z(l/2)$ [m]	$\Delta M(l/2)$ [kNm]	$H \cdot u_z(l/2)$ [kNm]	$\frac{\Delta M(l/2)}{M_0(l/2)}$ [%]
Spojité rovnomerné	4500	2250.0	0.102273	60.474	230.114	1.344
Spojité na časti	3375	1687.5	0.076394	32.339	128.915	0.958
Spojité na dĺžku	4505	2252.5	0.102377	60.654	230.607	1.346

3.4.4 Prosté podoprenie,oblúk s malou smelosťou, roztlačený vo vrchole

Spôsob zaťaženia	$u_z(l/2)$ [m]	$\Delta M(l/2)$ [Nm]
Spojité rovnomerné	0.001737	0.000
Spojité na časti	0.001337	0.001
Spojité na dĺžku	0.001857	0.073

3.5 Závěr

Modelové příklady potvrdili, že je možné řešit ideální tvar obluku pomocou lanovej rovnice. Preukázalo sa nimi, že otočené riešenie lanovej rovnice platí v prípade nekonečnej normálovej tuhosti obluku – pri predpoklade nestlačiteľnosti strednice je nulové ohybové namáhanie obluku, nezávisle na spôsobe podoprenia. Platí pre obojstranné kĺbové uloženie aj obojstranné votknutie.

Pretože predpoklad o nestlačiteľnosti strednice nie je nikdy splnený, aj oblúk, ktorého počiatočná geometria odpovedá tlakovej čiare, je v dôsledku stlačenia strednice vo výsledku namáhaný ohybovým momentom.

Maximum tohoto momentu je u oblúkov podoprených kĺbovo v polovici rozpätia. U votknutých oblúkov sú lokálne maximá v podpore a v polovici rozpätia, pričom moment vo votknutí je približne dvojnásobkom momentu v poli.

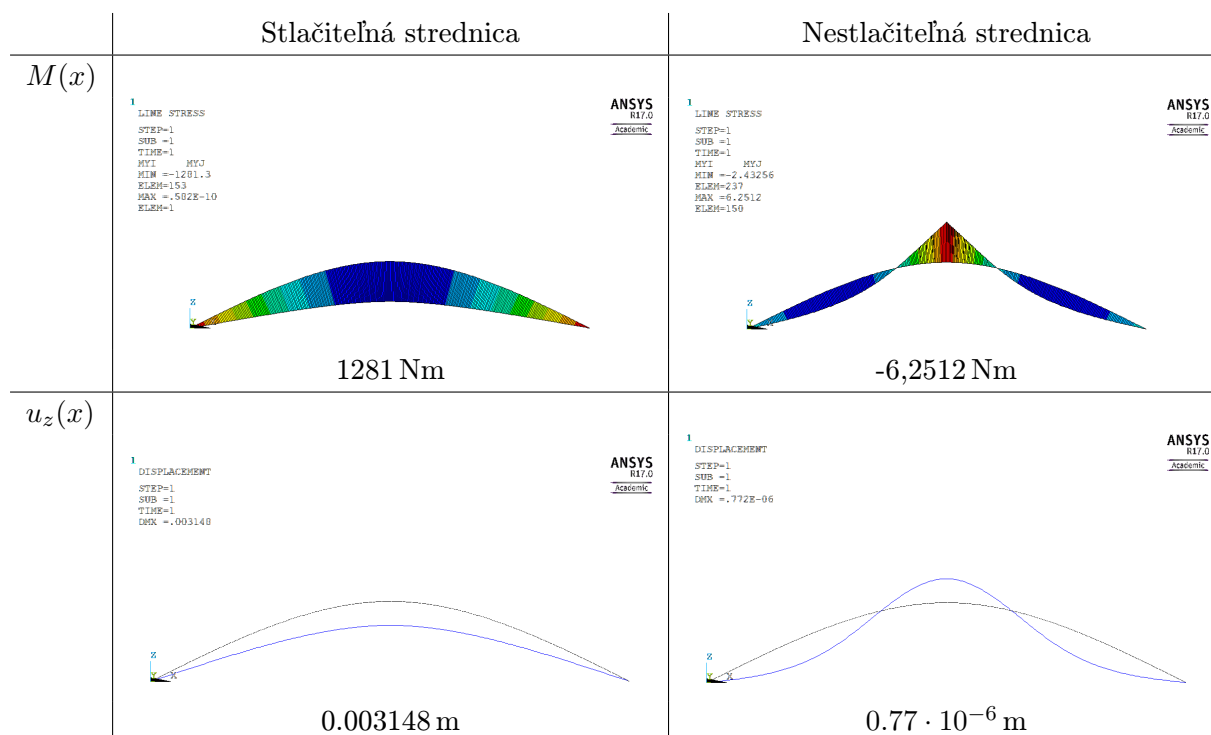
Veľkosť ohybového momentu ktorý vzniká z dôvodu stlačiteľnosti strednice sa v modelových príkladoch pohybovala v ráde jednotiek kNm u oblúkov s malou smelosťou, u smelých oblúkov ohybový moment dosahoval desiatky kNm. Podiel tohoto momentu oproti momentu na náhradnom prostom nosníku sa pohyboval v závislosti na smelosti v stotinách až jednotkách percent.

Príkladmi sa ukázalo, že pre oblúky s konečnou normálovou tuhosťou, je toto ohybové namáhanie možné odstrániť rozoprením obluku vo vrchole.

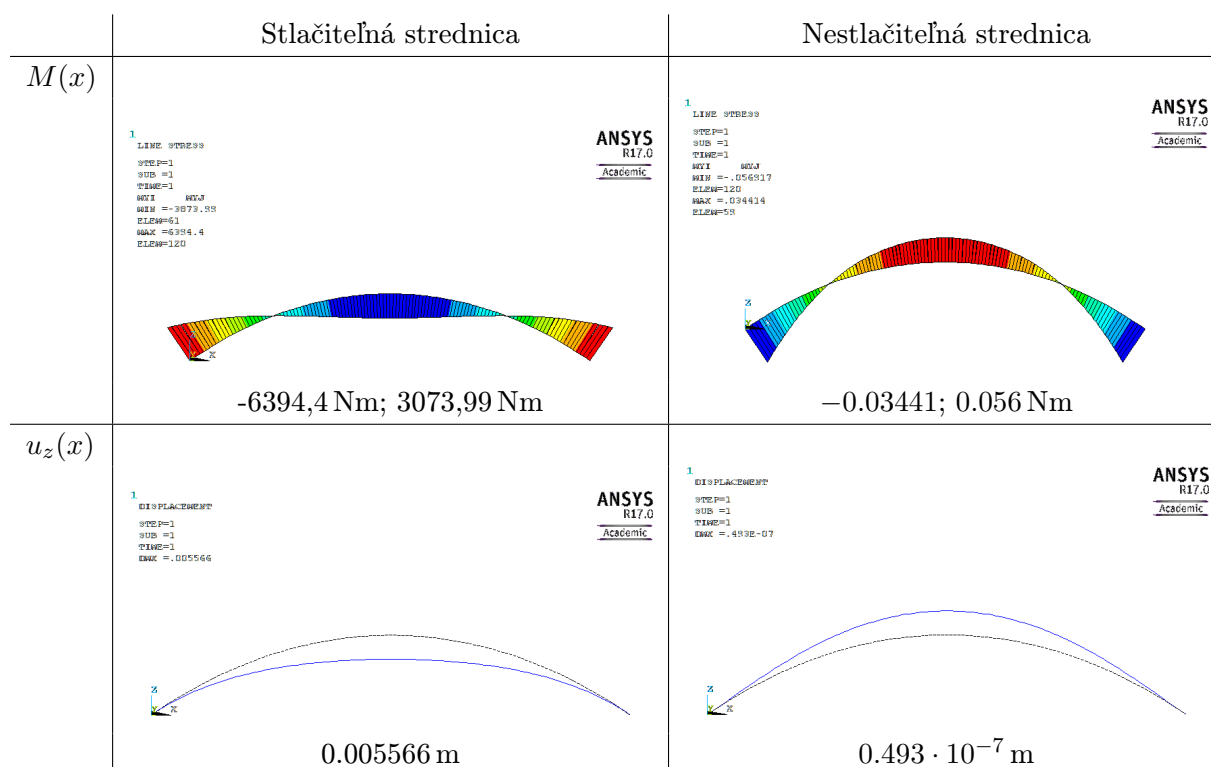
Zo vzťahov platných pre rovnicu prievesovej krivky $z(x)$ navyše vyplýva, že konštrukcie so zaťažením daným na priemet, nie je nutné riešiť cez lanovú rovnicu. V prípade požiadavky na vzopätie obluku f alebo veľkosť horizontálnej zložky reakcie H je riešenie možné dostať nanormovaním momentu $M_0(x)$ uprostred rozpätia na vzopätie f . Táto úprava je ekvivalentná s podelením ohybového momentu veľkosťou horizontálnej zložky reakcie H .

3.6 Obrázková příloha–výsledky, vybrané případy

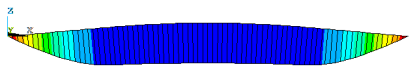
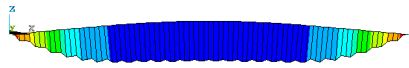


3.6.1 Oblúk s malou smelostou, klbové uloženie, trojuholníkové zaťaženie



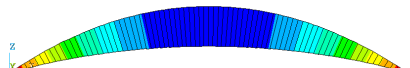
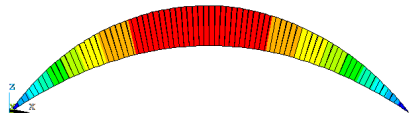
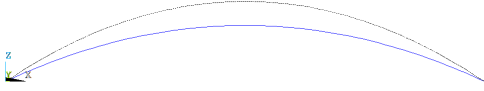
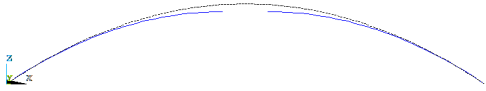
3.6.2 Oblúk s malou smelostou, votknutý, pravá reťazovka



3.6.3 Oblúk s veľkou smelosťou, klbové uloženie, spojité zaťaženie na časti oblúku

	Stlačiteľná strednica	Nestlačiteľná strednica
$M(x)$	<p>1. LINE STRESS STEP=1 SUB=1 TIME=1 MY1 MY2 MIN = -22338.0 ELZAP=40 MAX = 46662.08 ELZAP=1</p> <p>ANSYS R17.0 Academic</p>  <p>32338,8 Nm</p>	<p>1. LINE STRESS STEP=1 SUB=1 TIME=1 MY1 MY2 MIN = -0.13377 ELZAP=42 MAX = 0.8642-11 ELZAP=1</p> <p>ANSYS R17.0 Academic</p>  <p>0.013377 Nm</p>
$u_z(x)$	<p>1. DISPLACEMENT STEP=1 SUB=1 TIME=1 ENOC = 0.076334</p> <p>ANSYS R17.0 Academic</p>  <p>0.076334 m</p>	<p>1. DISPLACEMENT STEP=1 SUB=1 TIME=1 ENOC = 0.308-07</p> <p>ANSYS R17.0 Academic</p>  <p>$0.308 \cdot 10^{-7}$ m</p>

3.6.4 Oblúk s malou smelosťou, rozťahený vo vrchole, spojité rovnomerné zaťaženie

	Stlačiteľná strednica	Rozťahenie vo vrchole
$M(x)$	<p>1. LINE STRESS STEP=1 SUB=1 TIME=1 MY1 MY2 MIN = -1020.61 ELZAP=41 MAX = 0 ELZAP=1</p> <p>ANSYS R17.0 Academic</p>  <p>1820,61 Nm</p>	<p>1. LINE STRESS STEP=1 SUB=1 TIME=1 MY1 MY2 MIN = -7202-11 ELZAP=1 MAX = 1.1792-06 ELZAP=30</p> <p>ANSYS R17.0 Academic</p>  <p>$-0.179 \cdot 10^{-6}$ Nm</p>
$u_z(x)$	<p>1. DISPLACEMENT STEP=1 SUB=1 TIME=1 ENOC = 0.004548</p> <p>ANSYS R17.0 Academic</p>  <p>0.004548 m</p>	<p>1. DISPLACEMENT STEP=1 SUB=1 TIME=1 ENOC = 0.001797</p> <p>ANSYS R17.0 Academic</p>  <p>0.001797 m</p>

4 Geometria

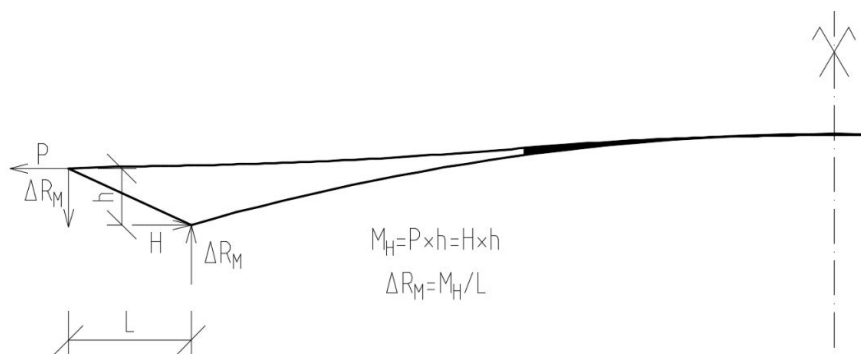
4.1 Statická schéma lávky

Nosná konštrukcia lávky je tvorená predpätou betónovou mostovkou, dvoma oceľovými oblúkmi, oceľovými priečnikmi a betónovými vzperami spájajúcimi päty oblúku s mostovkou. Predpätie je do mostovky vnášané dvoma typmi lán. Montážne laná zabezpečujú tvar konštrukcie, finálne laná vnášajú do mostovky tlakovú rezervu. Jedná sa o kombináciu oblúku s predpätým pásom.

Krajné časti mostovky pôsobia ako predpätý pás, majú konvexný tvar, vynášané sú predpínacími káblami. Mostovka je v strednej časti lávky cez oceľové priečniky uložená na oceľových oblúkoch.

Konštrukcia je navrhnutá ako samokotvený systém – odstraňuje horizontálne reakcie v mieste založenia. Princípom konštrukcie je vyrovnanie horizontálnych reakcií – veľkosť predpínacej sily predpätého pásu je rovná horizontálnej zložke reakcie oblúku. Konštrukcia tak na podložie pôsobí iba zvislo.

Ohybový moment, ktorý vzniká v dôsledku rôznej výškovej úrovne ťahovej a tlakovej horizontálnej reakcie, je prenesený dvojicou zvislých síl pôsobiacich na založenie lávky.



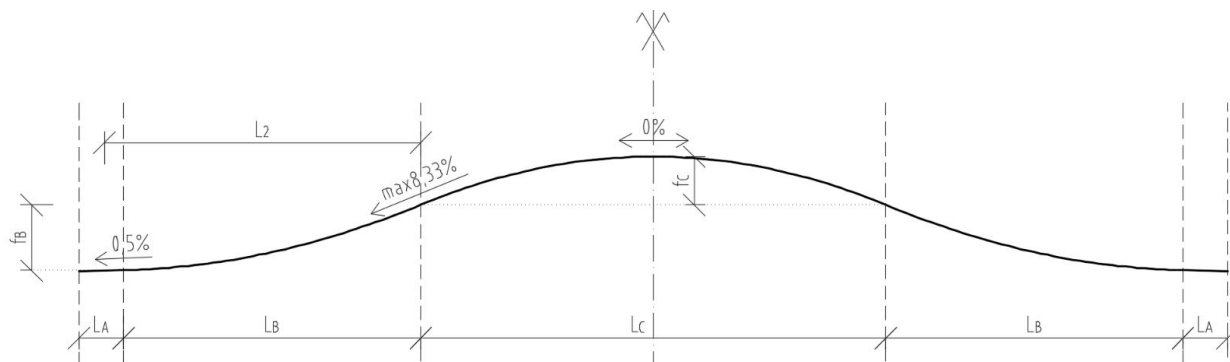
Obr. 14: Rovnováha reakcií na konštrukcii

4.1.1 Geometria mostovky

Mostovka je symetrická, jej tvar je možné rozdeliť na 5 úsekov. Prvá a posledná (piata) časť sú vedené v konštantnom pozdĺžnom sklone (úsek A). Na ne naväzuje časť predpätého pásu tvaru konvexnej paraboly (úsek B). Stredná časť mostovky, uložená na oblúku má tvar konkávnej paraboly (úsek C).

Tvar mostovky je určený z nasledujúcich podmienok:

- Návaznosť výškových súradníc jednotlivých úsekov
- Návaznosť dotyčníc jednotlivých úsekov
- Nulový pozdĺžny sklon vo vrchole mostovky
- Dĺžka jednotlivých úsekov v násobku počtu segmentov
- Maximálny pozdĺžny sklon na lávkach pre chodcov v hodnote 8,33 % (pomer 1:12)
- Minimálny pozdĺžny sklon v hodnote 0,5 %



Obr. 15: Geometrické parametre mostovky

Z týchto podmienok je určený funkčný predpis jednotlivých častí mostovky a vyjadrené parametre parabolických úsekov – dĺžka a vzopätie.

f_B – vzopätie konvexnej časti

f_C – vzopätie konkávnej časti

$L_2 \neq L_B$ – dĺžka paraboly konvexnej časti

Zo vzopätia f_B , dĺžky paraboly L_2 , hmotnosti mostovky a podmienky, že radiálne zložky predpätia sa rovnajú tiaži mostovky je ďalej dopočítaná potrebná predpínacia sila.

$$p_B = \frac{8 \cdot f_B \cdot P}{(2 \cdot L_2)^2} = g$$

$$P = \frac{g \cdot (2 \cdot L_2)^2}{8 \cdot f_2}$$

P – predpínacia sila

p_B – radiálne zložky od predpätia

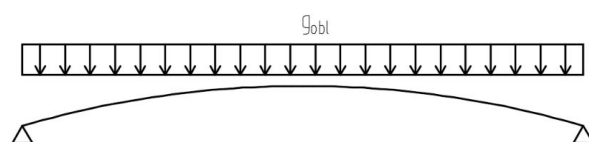
g – tiaž mostovky

4.1.2 Geometria oblúku

Tvar oblúkov v pozdĺžnom smere lávky je určený ako tlaková čiara.

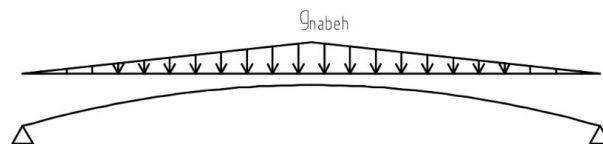
Sú uvažované nasledujúce zaťažovacie stavy:

- Vlastná tiaž oblúku, rozdelená na konštantnú časť g_{obl} a tiaž nábehu g_{nabeh} .



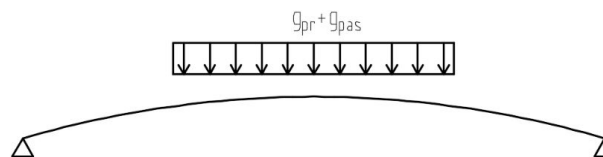
Obr. 16: Zaťaženie na oblúk – vlastná tiaž

Výpočet zjednodušene uvažuje lineárny nábeh oblúkov smerom k stredu lávky a zanedbáva vplyv sklonu oblúku. Zaťaženie je zväčšené o hodnotu 15 %, čo je odhad hmotnosti vnútorných výstuh oblúkov.



Obr. 17: Zaťaženie na oblúk – nábeh

- Tiaž mostovky uloženej na strednej časti oblúkov g_{pas}
- Tiaž priečnikov prepočítaná na spojité rovnomerné zaťaženie g_{pr}
- Priťaženie oblúku od predpätia p_c



Obr. 18: Zaťaženie na oblúk – mostovka + predpätie

Pretože stredná časť mostovky uložená na oblúky je konkávneho parabolického tvaru, v dôsledku predpätia mostovky vznikajú radiálne zložky pôsobiace na oblúk. Radiálne zložky sú uvažované v smere zvislo dole.

$$p_C = \frac{8 \cdot f_C \cdot P}{L_C^2}$$

Zo známej hodnoty horizontálnej reakcie H ($H = P$) v päte, zaťaženia pôsobiaceho na oblúk a momentovej podmienky rovnováhy vo vrchole oblúku je určené potrebné vzopätie oblúku.

$$f_{obl} = \frac{1}{P} \cdot \left[\frac{1}{8} \cdot g_{obl} \cdot L_{obl}^2 + g_{nabeh} \cdot \frac{L_{obl}^2}{24} + (g_{pas} + g_{pr} + p_c) \cdot L_c \cdot \left(\frac{L_{obl}}{2} - \frac{L_c}{4} \right) \right]$$

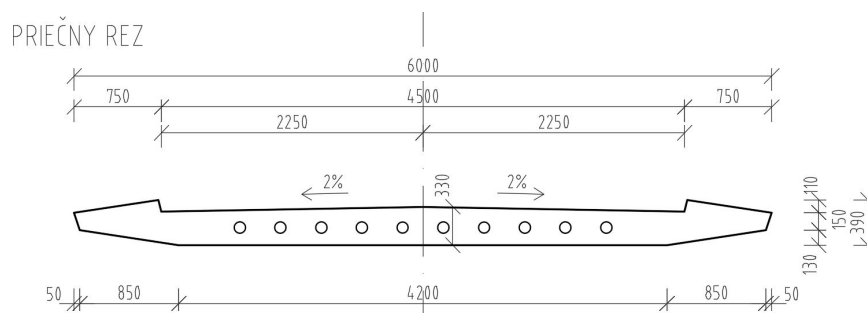
Vzájomná poloha mostovky a oblúku neovplyvňuje teoretické riešenie systému.

4.2 Výsledná geometria

4.2.1 Popis

Mostovka

Mostovka je tvorená dodatočne predopnutými betónovými segmentmi. Rozpätie mostovky je 133,400 m. Dĺžka segmentu je 3 m, šírka segmentu je 6 m, hrúbka mostovky je 330 mm.



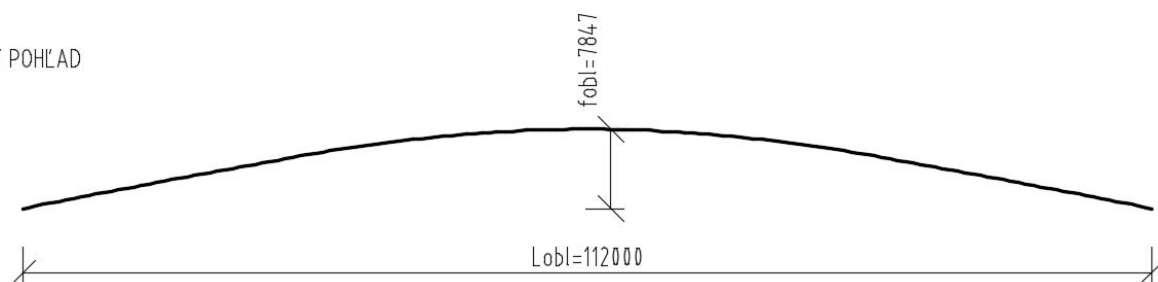
Obr. 19: Prierez mostovky

Oblúky

Hlavná nosná časť konštrukcie sú 2 oceľové oblúky. Rozpätie oblúkov je 112 m.

Tvar oblúku je v pozdĺžnom smere navrhnutý s ohľadom na pôsobiace zaťaženie – v ideálnej tlakovej čiare. Vzopätie oblúku v pozdĺžnom smere je 7,847 m.

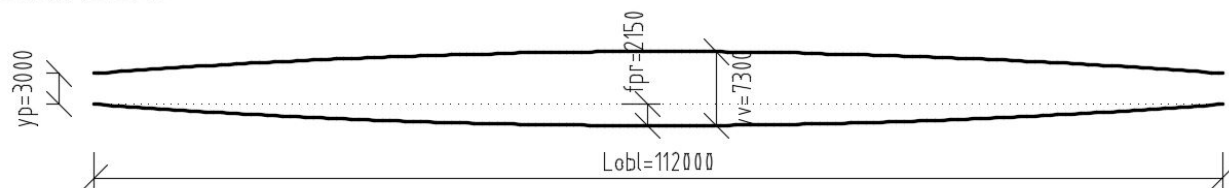
OBLÚKY POHĽAD



Obr. 20: Oblúky – pozdĺžna geometria

V priečnom smere sú oba oblúky sklonené od zvislej roviny o uhol $15,3^\circ$ v smere od osi lávky. Vzopätie oblúku je v pôdoryse 2,15 m. Päty oblúkov sú v osovej vzdialenosti 3 m. Osová vzdialenosť oblúkov vo vrchole 7,3 m.

OBLÚKY PÔDORYS



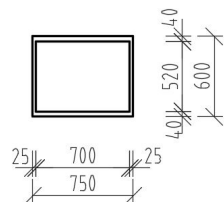
Obr. 21: Oblúky – pôdorysná geometria

Prierez oblúku je uzavrený zvarovaný profil tvaru \square . Oblúky majú prierez konštantnej šírky

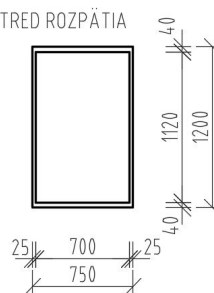
0,75 m. Výška obluku je proměnná, v intervale 0,6 – 1,2 m s parabolicky rostoucí výškou směrem ku středu obluku. Hrúbka stojiny je 25 mm, pásnice mají 40 mm.

PRIEREZ OBLÚKU

PRI PODPORE



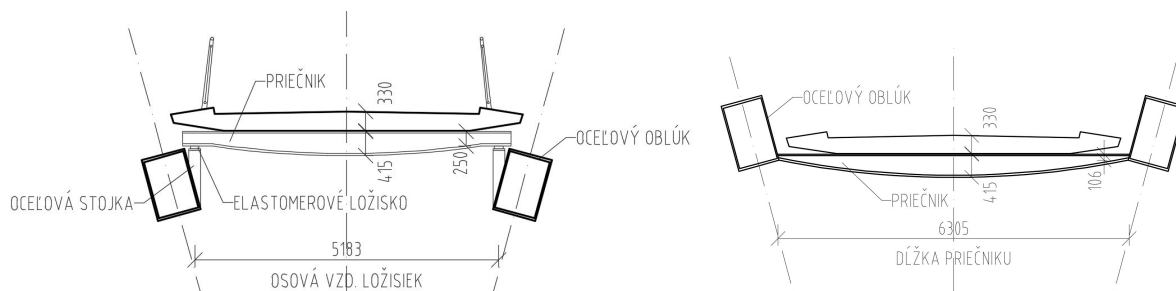
UPROSTŘED ROZPĚTIA



Obr. 22: Prierez obluku

Oblúky sú v priečnom smere vzájomne spojené pomocou oceľových priečnikov. Priečniky sú umiestnené symetricky vzhľadom k osi obluku na dĺžke 54 m. Celkový počet priečnikov je 19, osová vzdialenosť priečnikov je 3 m. Priečniky sú s oblúkom spojené pevne, alebo sú podoprené zvislými oceľovými stojkami, na ktorých je umiestnené elastomerové ložisko. Spôsob spojenia vychádza zo vzájomnej polohy mostovky, priečnikov a oblúkov.

Priečniky sú tvorené I profilom s promennou výškou, parabolicky rastúcou doprostred rozpätia.



Obr. 23: Spojenie oblúkov s priečnikmi

Podmienky uvedené v kapitole 4.1 je možné splniť nekonečne mnoho spôsobmi. Vhodné riešenie je také, ktoré okrem popísaných rovníc vyhovuje aj priestorovým geometrickým podmienkam, predpokladanému tvaru oblúkov a nedochádza pri ňom ku kolízii jednotlivých prvkov lávky. Vybrané riešenie teda rešpektuje osadenie lávky do terénu a z toho vyplývajúcu vzájomnú výškovú polohu mostovky a oblúkov. Geometria lávky je navrhnutá tak, aby bolo možné mostovku v strednej časti položiť na priečniky a tým uložiť na oblúk. Ďalej je zohľadnená možná kolízia mostovky a oblúkov vzhľadom k ich pôdorysnému vykloneniu a umiestneniu mostovky v strednej časti medzi oblúky.

4.2.2 Nájdene geometria

Vstupné údaje:

Tiažové zrýchlenie	g	9.810	m/s ²	2.5*9.81
Objemová hm. betónu		24.525	kN/m ²	
Hmotnosť oceli		7850.000	kg/m ³	
Maximálny sklon		8.333	%	
Rozpätie	L pás	133.400	m	
	L obl	112.000	m	
Dĺžka segmentu	L segment	3.000	m	

Mostovka

A-priama část

Parametre

Délka	La	5.200	m
Sklon	sa	0.500	%

Súradnice

Počiatok súradnice	x0	0.000	-
	z0	0.000	-
Koniec súradnice	x1	5.200	m
	z1	0.026	m

B-konvexná parabola

Parametre

Počet segmentov	n seg	11.500	
Délka	Lb	34.500	m
Sklon počiatok	sb1	0.500	%
Sklon koniec	sb2	8.300	%

Súradnice

Počiatok súradnice	x1	5.200	-
	z1	0.026	-
Koniec súradnice	x2	39.700	m
	z2	1.544	m
Vzopätie	fb	1.524	m

C-konkávna parabola

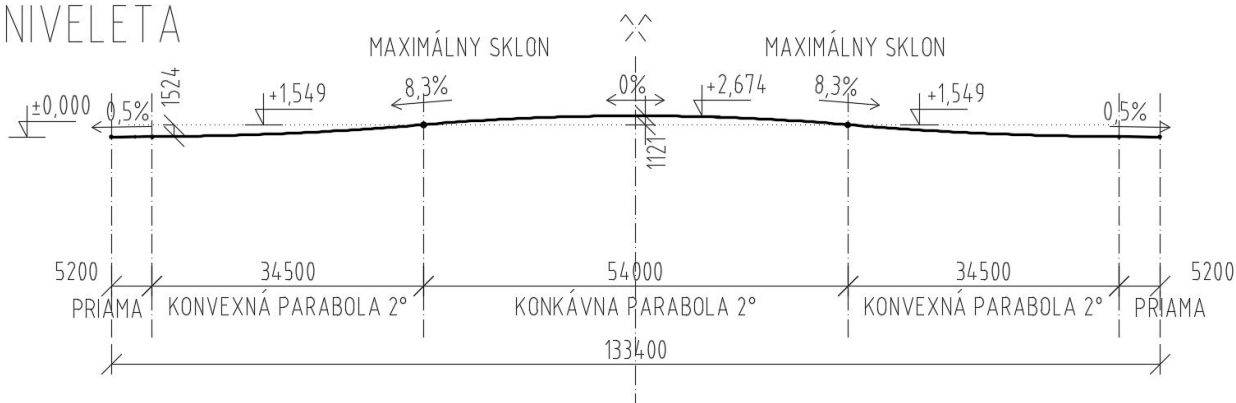
Parametre

Počet segmentov	n seg	9.000	ks
Délka	Lc/2	27.000	m
Sklon počiatok	sb2	8.300	%
Sklon koniec	sb3	0.000	%

Súradnice

Počiatok súradnice	x2	39.700	-
	z2	1.544	-
Koniec súradnice	x3	66.700	m
	z3	2.665	m
Vzopätie	fc	-1.121	m

NIVELETA



Oblúk

Zaťaženie na pás

Prierez plocha, celý priečny rez	1.762	m ²
Prierezová plocha bez lán	1.734	
Vlastná tiaž	42.519	kN/m
Laná (montážne)	1.317	kN/m
Spolu	43.836	kN/m

Vzopätie	1.524	m
Nutná predpínacia sila	19388.928	kN
Použitá predpínacia sila	19388.928	kN

Zaťaženie na oblúk:

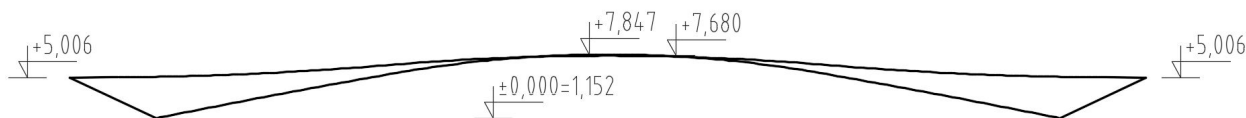
Dĺžka ležiaceho pásu	d	54.000	m
Rozpätie oblúku	Lobl	112.000	m

Zaťaženie

Vlastná tiaž konštantná	g _k	15.232	kNm
Tiaž nábehu	g _n	5.314	kN/m
Tiaž pásu	g _p	43.836	kN/m
Príťaženie od predpätia	p	59.603	kN/m
Tiaž priečnikov	g _v	3.500	kN/m

Vzopätie	f	7.847	m
-----------------	----------	--------------	----------

4.2.3 Vzájomná poloha mostovky a oblúkov



Obr. 24: Vzájomná poloha mostovky a oblúkov

5 Fázy výstavby

Pri analýze statických aj dynamických účinkov je zohľadnená zmena statického pôsobenia lávky počas výstavby. Vo výpočtovom modeli sú uvažované 4 fázy výstavby lávky.

1. Montážny stav

V montážnom štádiu sú jednotlivé segmenty navlečené na montážne laná. Je povolený vodorovný posun segmentov po lane a ich vzájomné pootočenie okolo osi y . Uvažovaná je tiaž dobetonávky medzi segmentmi. Oblúky sú podoprené v päte podporou prenášajúcou iba zvislú silu.

2. Východzí stav

Východzí stav predstavuje zmonolitnenie mostovky a dopnutie finálnymi lanami. Je zabránené vzájomnému pootočeniu segmentov okolo osi y . Aktivované sú finálne laná.

3. Ostatné stále zaťaženie

V treťom štádiu sú zainjektované laná – je zabránené vodorovnému posunu segmentov po lanách. Na lávku je aplikované ostatné stále zaťaženie.

4. Prevádzka

V prevádzkovom štádiu sa uvažuje zmena pôsobenia podpor oblúkov. V päťoch oblúkov je zabránené ich pootočeniu a sú aktivované vodorovné podpory – okolitá zemina. Aplikované je premenné zaťaženie.

6 Posúdenie konštrukcie

Pre posúdenie prevádzkových štádií je na lávke definovaných niekoľko typov zaťaženia.

Stále zaťaženie tvorí vlastná tiaž konštrukcie a ostatné stále zaťaženie (zábradlie).

Z premenného zaťaženia je uvažované zaťaženie chodcami (v rôznych polohách na lávke), a zaťaženie teplotou (rovnorné oteplenie a ochladenie konštrukcie).

Zohľadnené sú straty predpätia montážnych aj finálnych lán (krátkodobé aj dlhodobé) a dotvarovanie a zmršťovanie betónových častí lávky.

Posúdené sú montážne stavy lávky, medzný stav únosnosti a medzný stav použiteľnosti.

Pre pôsobenie mostovky v priečnom smere a posúdenie priečnikov sú vytvorené samostatné modely, lepšie vystihujúce správanie uvedených prvkov.

Pre výpočet statických účinkov je použitý geometricko - nelineárny výpočet.

6.1 Montážny stav

V montážnom stave sú overené nasledujúce podmienky:

- Maximálne napätie v montážnych lanách pri napínaní a zakotvení

$$\sigma_{p,ms} \leq \sigma_{p,max}$$

$$\sigma_{p,ms,0} \leq \sigma_{pm0,max}$$

- Normálové napätie v mostovke v pozdĺžnom smere

$$\sigma_c^+ \leq f_{ct,eff}$$

$$\sigma_c^- \leq f_{ck}$$

- Hlavné napätie v jednotlivých segmentoch pri montáži

$$\sigma_1^- \leq f_{ct,eff}$$

- Ekvivalentné napätie v oblúku

$$\sigma_e \leq fy/\gamma_{M0}$$

6.2 Východzí stav

V východzom stave sú overené nasledujúce podmienky:

- Maximálne napätie vo finálnych lanách pri napínaní a zakotvení

$$\sigma_{p,vs} \leq \sigma_{p,max}$$

$$\sigma_{p,vs,0} \leq \sigma_{pm0,max}$$

- Normálové napätie v mostovke v pozdĺžnom smere

$$\sigma_c^+ \leq f_{ct,eff}$$

$$\sigma_c^- \leq f_{ck}$$

- Ekvivalentné napätie v oblúku

$$\sigma_e \leq fy/\gamma_{M0}$$

6.3 Medzný stav použiteľnosti

6.3.1 Mostovka

Obmedzenie napätia v betóne

Musia byť splnené nasledujúce podmienky:

Tlakové napätie v betóne:

$$|\sigma_c^-| \leq 0,6 \cdot f_{ck} \quad - \text{charakteristická kombinácia}$$

$$|\sigma_c^-| \leq 0,45 \cdot f_{ck} \quad - \text{kvizistála kombinácia}$$

Ťahové napätie v betóne:

$$\sigma_c^+ \leq f_{ct,eff}$$

Podmienky sú posudzované v dvoch časoch, v čase uvedenia lávky do prevádzky t_0 , a v čase životnosti konštrukcie t_∞ . Z dôvodu neroztvárania špár je navyše požiadavka na tlak v mostovke v častej kombinácii.

Obmedzenie napätia v predpínacej výstuži

Ťahové napätie v predpínacej výstuži:

$$\sigma_{pm,t} \leq 0,75 \cdot f_{pk} \quad - \text{charakteristická kombinácia}$$

$$0,75 \cdot f_{pk} = 0,75 \cdot 1860 = 1395 \text{ MPa}$$

Podmienka je overená pre montážne aj finálne predpätie v čase uvedenia lávky do prevádzky t_0 . Vzhľadom na pokles predpínacej sily od pôsobenia kladnej teploty, kombinácie obsahujúce rovnomerné oteplenia mostu nie sú posudzované.

6.3.2 Obmedzenie priehybu

Priehyb je posúdený zvlášť pre mostovku a oceľové oblúky.

Medzný priehyb pre oceľové lávky pre chodcov je stanovený ako $L/250$. Pre oblúkové konštrukcie sa priehyb vyšetruje v $1/4$ rozpätia pri jednostrannom zaťažení. Za L sa dosadzuje dĺžka kladnej polvlny ohybovej čiary, prípadne polovica rozpätia. Posúdené sú časté kombinácie obsahujúce jednostranné zaťaženie a rovnomerné ochladenie.

Pre konštrukcie z predpätého betónu je prípustný priehyb $L/600$, kde L je rozpätie poľa prostého alebo spojitého nosníku. Priehyb sa posudzuje zvlášť pre zaťaženie stále a zaťaženie pohyblivé, príp. klimatické.

Pri posúdení priehybu mostovky je zohľadnené rôzne pôsobenie uloženia mostovky na priečniky pre rôzne typy zaťaženia. Posúdené sú časté kombinácie zaťaženia.

6.4 Medzný stav únosnosti

Na medzný stav únosnosti sú posúdené nasledujúce časti lávky:

- Mostovka pozdĺžny smer – segmentová časť (N+M, V)
- Mostovka pozdĺžny smer – monolitická časť v mieste pripojenia na opory (N+M, V)
- Mostovka priečny smer (N+M, V)
- Vzpery (N+M, V)
- Oceľové priečniky
- Oblúky

6.4.1 Mostovka

Pozdĺžny smer

Pri posúdení N+M sú použité nasledujúce zjednodušenia:

- Nie je počítané základné napätie v predpínacej výstuži σ_p^0 .
- Vzdialenosť ťažiska predpínacej výstuže a ťažiska prierezu je veľmi malá. Je zanedbaný vplyv predpínacej výstuže na ohybovú únosnosť. Posúdenie je prevedené v špáre medzi segmentami – nieje uvažovaná betonárska výstuž. $M_{Rd} = A_{cc} \cdot f_{cd} \cdot z_{cc}$
- Posúdené sú stavy pre najväčší ohybový moment, najväčšiu normálovú silu a najmenšiu normálovú silu.

6.4.2 Ocelové prvky – spôsob posúdenia

Medzný stav únosnosti ocelových prvkov mostu je posúdený podľa pružného vzťahu. Pri pružnom overení má v rozhodujúcom bode prierezu byť splnená podmienka:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right) \leq 1$$

$\sigma_{x,Ed}$ – návrhové pozdĺžne normálové napätie v posudzovanom bode

$\sigma_{z,Ed}$ – návrhové priečne normálové napätie v posudzovanom bode

τ_{Ed} – návrhové šmykové napätie v posudzovanom bode

Pre prierezy triedy 4 majú byť pre výpočet použité vlastnosti účinného prierezu.

Pretože oblúk bude opatrený výstuhami proti vydutiu, pre pružný posudok sú uvažované neredukované prierezové charakteristiky pre všetky triedy prierezov.

Posúdenie vychádza z Misesovej podmienky plasticity.

Misesova podmienka plasticity

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{xy}^2)} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{2 \cdot \sigma_x^2 - 2 \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + \sigma_y^2 - 2 \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_z^2 + \sigma_z^2 - 2 \cdot \sigma_z \cdot \sigma_x + \sigma_x^2 + 6 \cdot (\tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{xy}^2)} = \\ &= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y - \sigma_y \cdot \sigma_z - \sigma_z \cdot \sigma_x + 3 \cdot (\tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{xy}^2)} \leq \sigma_M \end{aligned}$$

σ_e je tzv. redukované (porovnávacie, ekvivalentné) napätie

σ_M je medzné napätie, pre oceľ stanovené ako f_y/γ_{M0}

Výpočet ekvivalentného napätia v programe Ansys je totožný s uvedenými vzťahmi. Medzný stav únosnosti je posúdený pomocou tohoto programu.

The von Mises or equivalent stress σ_e (output as SEQV) is computed as:

$$\sigma_e = \left[\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)] \right]^{\frac{1}{2}}$$

Výpočet ekvivalentného napätia programom Ansys je overený ručným výpočtom na vybraných posudzovaných prierezoch.

6.4.3 Ocelový oblúk – imperfekcie

Pri globálnej analýze konštrukcie môžu byť vnútorné sily určené pomocou analýzy prvého alebo druhého rádu. Účinky druhého rádu znamenajú účinky pretvorenej geometrie.

Pri overení stability konštrukčnej sústavy sa má uvažovať vplyv deformácií konštrukcie zavedením imperfekcií a účinkov druhého rádu.

Pre stabilitu jednotlivých prvkov platí, že ak sú účinky druhého rádu jednotlivých prvkov a príslušné imperfekcie úplne zahrnuté do globálnej analýzy, nieje potrebné individuálne posúdenie stability týchto prvkov.

Pre globálnu analýzu sa má tvar globálnych a lokálnych imperfekcií určiť podľa spôsobu vybočenia konštrukcie v pružnom stave v uvažovanej rovine vybočenia. Symetrický a asymetrický tvar vybočenia v rovine, z roviny a v priestore sa má uvažovať pre najnepriaznivejší smer a spôsob.

Pretože je použitý geometricky nelineárny výpočet, účinky druhého rádu sú zohľadnené v globálnom modeli.

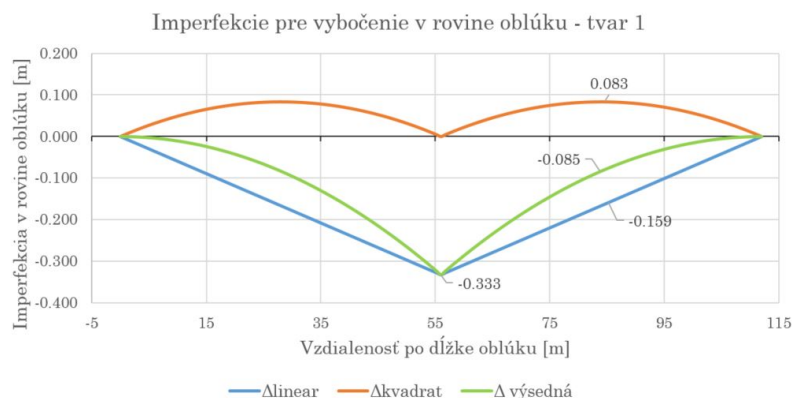
Pre oblúkové mosty je imperfekcie pre rôzne spôsoby vybočenia možné stanoviť podľa prílohy D normy [6].

Vybočenie v rovine

- Symetrický tvar (tvar 1)

Tvar imperfekcie:	parabola
Krivka vzpernej pevnosti :	c

Dĺžka poloblúku v ose	s	66.672	m	$e_0 = s / 200$ $f = e_0 / 4$
Polovica rozpätia	$l/2$	56.000	m	
Lineárny posun	e_0	0.333	m	
Vzopätie paraboly	f	0.083	m	

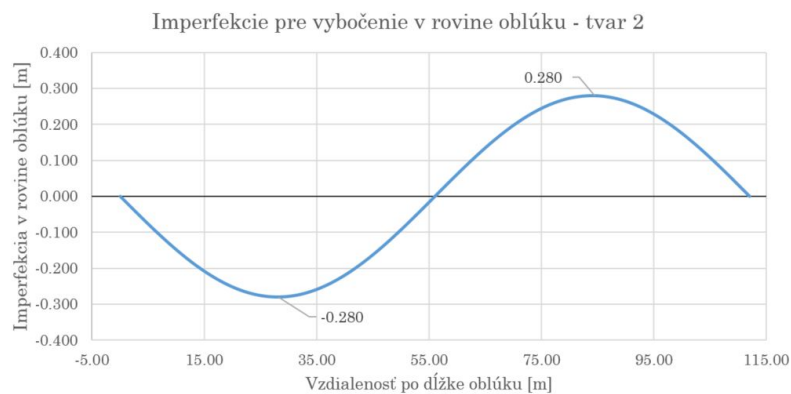


• Nesymetrický tvar (tvar 2)

Tvar imperfekcie:	sinusoida
Krivka vzpernej pevnosti :	c

Rozpätie oblúku	l	112.000	m
Amplitúda	e0	0.280	m

$e0=l/400$



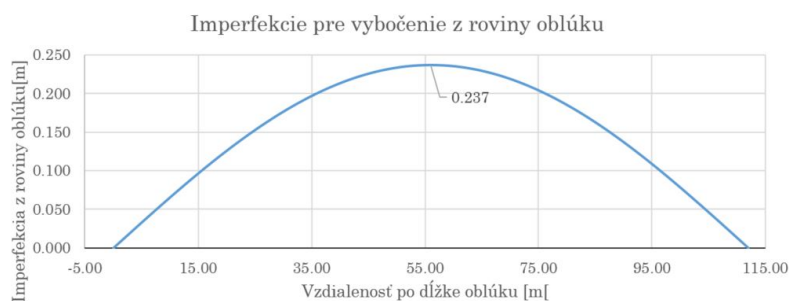
Vybočenie z roviny

Tvar 3

Tvar imperfekcie:	sinusoida
Krivka vzpernej pevnosti :	c

Polovica rozpätia	l	112.000	m
Náhradné rozpätie	l1	47.329	m
Amplitúda	e0	0.237	m

$l1=\sqrt{20 \cdot l}$
 $e0=l/400$



7 Dynamika

Z dynamických výpočtov je prevedená modálna analýza a analýza odozvy na harmonické budenie konštrukcie.

7.1 Modálna analýza

V modálnej analýze je vypočítaných 20 prvých vlastných tvarov kmitu.

Číslo vl.f.	Frekvencia	Tvar
i	ω_i	
[-]	[Hz]	
1	0.73845	pozdlžny
2	0.88521	priečny
3	1.0863	pozdlžny
4	1.2403	pozdlžny
5	1.3411	pozdlžny
6	1.7163	torzný
7	1.8755	pozdlžny
8	2.3938	torzný
9	2.6422	pozdlžny
10	2.6742	priečny
11	2.8789	pozdlžny
12	3.3921	pozdlžny
13	3.544	torzný
14	3.6726	torzný
15	3.773	torzný
16	4.1272	torzný
17	4.2047	priečny
18	4.2152	priečny
19	4.2455	priečny
20	4.3287	priečny

7.2 Odozva na harmonické zaťaženie

Pre výpočet harmonickej odozvy sú použité dynamické zaťažovacie modely podľa Eurokódu. Uvažovaný je dynamický model zaťaženie jednou osobou (DLM1) a dynamický model zaťaženia súvislým prúdom chodcov (DLM3). Zaťaženie je uvažované vo vertikálnom aj horizontálnom smere. Vertikálny a horizontálny smer sú riešené samostatne.

Overené sú kritéria pohody chodcov na lávke. Norma uvádza nasledujúce doporučené maximálne hodnoty zrýchlenia kmitania konštrukcie:

- $0,7 \text{ m/s}^2$ pre zvislé kmitanie
- $0,2 \text{ m/s}^2$ pre vodorovné kmitanie od bežnej dopravy
- $0,4 \text{ m/s}^2$ pre vodorovné vibrácie od vodorovného zaťaženia davom ľudí

7.2.1 DLM1

Na výpočet odozvy konštrukcie na zaťaženie jednou osobou je použitá harmonická analýza (v programe Ansys, typ analýzy Harmic). Odozva je sledovaná pre prvé 4 vlastné tvary v bodoch s najväčšou výchylkou v príslušnom vlastnom tvare. Do týchto bodov je postupne umiestňované aj zaťaženie.

Z maximálnej hodnoty výchylky u_{max} za rezonancie je dopočítané zrýchlenie:

$$u(t) = u_{max} \cdot \sin(2\pi ft + \theta)$$

$$a(t) = -u_{max} \cdot (2\pi f)^2 \cdot \sin(2\pi ft + \theta)$$

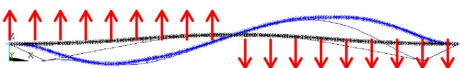
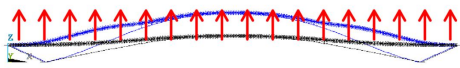
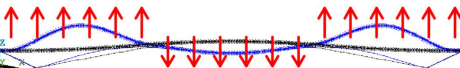
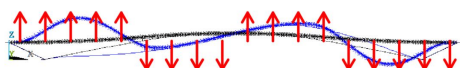
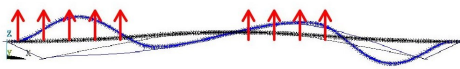
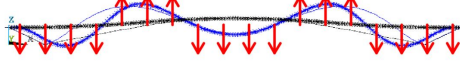
$$a_{max} = -u_{max} \cdot (2\pi f)^2$$

7.2.2 DLM3

Odozva na zaťaženie DLM3 – súvislým prúdom chodcov je počítaná analýzou časového priebehu (v programe Ansys, typ analýzy Transient). Pozornosť je venovaná vhodnému zvoleniu tlmenia konštrukcie pomocou Rayleighovho útlmu.

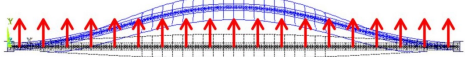
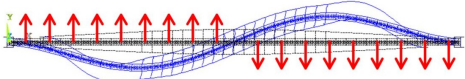
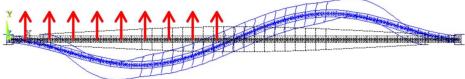
Vertikálny smer

Vo vertikálnom smere je počítané zrýchlenie konštrukcie pre nasledujúce schémy zaťaženia.

Tvar	Zaťaženie	f [Hz]	k_v [-]	a_{max} [m/s ²]	a_{lim} [m/s ²]	a_{max}/a_{lim} [%]
1		0,7385	0,869	0,43	0,7	61
3		1,0863	1,3452	0,14	0,7	20
4		1,2403	1,9612	0,18	0,7	26
5		1,3411	2,3644	0,93	0,7	132
		1,3411	2,3644	0,47	0,7	67
7		1,8755	3,000	0,60	0,7	86

Horizontálny smer

Vo horizontálnom smere je počítané zrychlenie konštrukcie pre nasledujúce schémy zaťaženia.

Tvar	Zaťaženie	f [Hz]	k_h [-]	a_{max} [m/s ²]	a_{lim} [m/s ²]	a_{max}/a_{lim} [%]
2		0,8852	3	0,28	0,4	70
10		2,6742	0,60861	0,09	0,4	22,5
		2,6742	0,60861	0,18	0,4	45

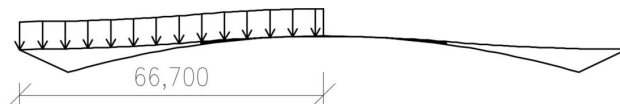
8 Stabilita

Stabilitný výpočet spočíva v určení veľkosti zaťaženia, pri ktorom lávka stratí stabilitu – vybočí, stratí tvar. Zistenie kritického namáhania je prevedené pomocou geometricko-nelineárneho výpočtu. Za kritické zaťaženie je považované zaťaženie, pri ktorom výpočet prestane konvergovať. Kritické zaťaženie je stanovené ako násobok charakteristickej hodnoty zaťaženia.

Kritické zaťaženie je stanovené v zvislom aj vodorovnom smere (kolmom na mostovku).

8.1 Stabilita vo zvislom smere

Konštrukcia je náchylná na stratu stability pri jednostrannom zaťažení.



Obr. 25: Stabilita – zvislý smer, zaťaženie polovica mostovky

Kritická hodnota zaťaženia pri ideálnom tvare oblúku je $65,8 \text{ kN/m}^2$. Pri uvážení deformácie strednice oblúku v tvare odpovedajúcom zaťaženiu je kritická hodnota zaťaženia $59,9 \text{ kN/m}^2$. Táto hodnota je 18,5 krát väčšia než hodnota zaťaženia chodcami daná normou.

8.2 Stabilita vo vodorovnom smere

Pretože v hlavnom modeli nie je uvažované žiadne priečne zaťaženie, pre stabilitný výpočet vo vodorovnom smere bolo zjednodušene vypočítané zaťaženie vetrom podľa kapitoly 8 [1].

Kritický násobok zaťaženia vetrom je $k=49,6$. Po spätnom prepočítaní na rýchlosť vetru, kritická rýchlosť vetru je $v_{cr} = \sqrt{k} \cdot v_b = \sqrt{49,6} \cdot 25 = 7,04 \cdot 25 = 176 \text{ m/s}$.

9 Závěr

V diplomové práci je provedený návrh a výpočet lávky pro peších. Navrhnuté sú tri varianty z ktorých je pre ďalšiu analýzu vybraná konštrukcia predpätého pásu podopreného oblúkmi.

Práca popisuje návrh geometrie vybranej konštrukcie, so zameraním na porozumenie statického správania oblúkových konštrukcií.

Posúdenie konštrukcie sa zameriava na posúdenie montážnych stavov, použiteľnosti a únosnosti konštrukcie. Je snaha zohľadniť správanie konštrukcie v čase, uvážením strát predpätia a reologických vlastností betónu.

Veľká pozornosť je venovaná dynamickému správaniu konštrukcie a jej odozve na harmonické zaťaženie.

Zoznam použitej literatúry

- [1] ČSN EN 1991-1-4 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí. Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Praha, ČNI 2013.
- [2] ČSN EN 1991-1-5 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí. Část 1-5: Obecná zatížení – Zatížení teplotou*. Praha, ČNI 2005.
- [3] ČSN EN 1991-2 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí. Část 2: Zatížení mostů dopravou*. Praha, ČNI 2005.
- [4] ČSN EN 1992-1-1 *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha, ČNI 2005.
- [5] ČSN EN 1992-2 *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí. Část 2: Betonové mosty - navrhování a konstrukční zásady*. Praha, ČNI 2007.
- [6] ČSN EN 1993-2 (736205) *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí. Část 2: Ocelové mosty*. Praha, ČNI 2008.
- [7] ČAMBULA, Jaroslav. *Navrhování mostních konstrukcí podle Eurokódů*. Praha: Pro Ministerstvo dopravy a Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2010. Technická knižnice (ČKAIT). ISBN 978-80-87093-90-0.
- [8] PROCHÁZKA, Jaroslav. *Navrhování betonových konstrukcí: příručka k ČSN EN 1992-1-1 a ČSN EN 1992-1-2*. Praha: Pro Ministerstvo pro místní rozvoj a Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2010. Technická knižnice (ČKAIT). ISBN 978-80-87438-03-9.
- [9] MACHÁČEK, Josef. *Navrhování ocelových konstrukcí: příručka k ČSN EN 1993-1-1 a ČSN EN 1993-1-8 ; Navrhování hliníkových konstrukcí : příručka k ČSN EN 1999-1*. Praha: Pro Ministerstvo pro místní rozvoj a Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Technická knižnice (ČKAIT). ISBN 978-80-87093-86-3.
- [10] BAŽANT, Zdeněk, Ladislav ČÍRTEK a Petr ŠTĚPÁNEK. *Betonové konstrukce II - Modul 07: Speciální problémy betonových montovaných konstrukcí*. Brno, 2006.
- [11] *Guidelines for the design of footbridges: guide to good practice*. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete, 2005. Bulletin (Fédération internationale du béton), 32. ISBN 28-839-4072-X.
- [12] ROOS, Iemke. *HUMAN INDUCED VIBRATIONS ON FOOTBRIDGES: Application & comparison of pedestrian load models*, 2009.

Zoznam príloh

P1. Použité podklady a varianty riešenia

P1.01	PODKLADY	M1:500
P1.02	VARIANT A	M1:250, 1:100, 1:50
P1.03	VARIANT B	M1:250, 1:100, 1:50
P1.04	VARIANT C	M1:250, 1:100, 1:50
P1.05	POROVNANIE VARIANTOV	M1:300

P2. Výkresy

P2.01	SITUÁCIA, POZDĹŽNY REZ	M1:150
P2.02	REZY	M1:50
P2.03	VÝKRES PREDPÍNACEJ VÝSTUŽE	M1:200, 1:50, 1:25
P2.04	TVAR SEGMENTU	M1:25, 1:10
P2.05	VÝSTUŽ SEGMENTU	M1:25
P2.06	TVAR VZPERY	M1:75, 1:50
P2.07	VÝSTUŽ OPORY	M1:25
P2.08	VÝSTUŽ VZPERY	M1:100, 1:50
P2.09	TVAR OBLÚKU	
P2.10	SCHÉMA ULOŽENIA OBLÚKU	

P3. Stavebný postup a vizualizácia

P3.01	STAVEBNÝ POSTUP	M1:500
P3.02	VIZUALIZÁCIA	

P4. Statický výpočet

P4.01	VÝPOČTOVÝ MODEL	
P4.02	MONTÁŽNY STAV, VÝCHODZÍ STAV, MSP, MSÚ	
P4.03	DYNAMIKA, STABILITA	
P4.03	VNÚTORNÉ SILY	

Zoznam obrázkov

1	Variant 1 – priečny rez	10
2	Variant 1 – pohľad	11
3	Variant 2 – priečny rez	11
4	Variant 2 – pohľad	11
5	Variant 3 – priečny rez	12
6	Variant 3 – pohľad	12
7	Porovnanie variant	13
8	Tlaková čiara, overenie – spôsoby zaťaženia	15
9	Spojité rovnomerné zaťaženie na priemet	16
10	Trojuholníkové zaťaženie	16
11	Spojité zaťaženie na časti oblúku	17
12	Spojité zaťaženie na dĺžku oblúku	17
13	Reťazovky pre rôzne parametre a,c	18
14	Rovnováha reakcií na konštrukcii	23
15	Geometrické parametre mostovky	24
16	Zaťaženie na oblúk – vlastná tiaž	24
17	Zaťaženie na oblúk – nábeh	25
18	Zaťaženie na oblúk – mostovka + predpätie	25
19	Prierez mostovky	26
20	Oblúky – pozdĺžna geometria	26
21	Oblúky – pôdorysná geometria	26
22	Prierez oblúku	27
23	Spojenie oblúkov s priečnikmi	27
24	Vzájomná poloha mostovky a oblúkov	29
25	Stabilita – zvislý smer, zaťaženie polovica mostovky	39